

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.12, 539.1.05

ДОЛГОЖИВУЩИЕ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ НА LHC

© 2020 г. Е. В. Жемчугов^{a, b, *}

^aИнститут теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Аликханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, 117218 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: zhemchugov@itep.ru

Поступила в редакцию 08.05.2020 г.

После доработки 31.07.2020 г.

Принята к публикации 31.07.2020 г.

Рассматривается рождение долгоживущих заряженных частиц с массой порядка 100 ГэВ в ультрапериферических столкновениях протонов или тяжелых ионов на Большом адронном коллайдере (БАК). Предлагается новый метод поиска таких частиц с использованием передних детекторов коллабораций ATLAS и CMS. Оцениваются массы и времена жизни долгоживущих заряженных частиц, на которые таким образом можно поставить модельно независимые ограничения, исходя из текущих данных БАК.

DOI: 10.1134/S2079562920040193

1. ВВЕДЕНИЕ

Заметную долю столкновений на Большом адронном коллайдере (БАК) составляют так называемые ультрапериферические столкновения. Это столкновения, в которых частицы проходят на некотором расстоянии друг от друга; сталкиваются при этом электромагнитные поля этих частиц. Частицы остаются целыми, и их можно зарегистрировать в специальных передних детекторах. Фотоны электромагнитного поля ультрарелятивистской частицы почти реальные, поэтому ультрапериферические столкновения можно рассматривать как столкновения двух реальных фотонов, распределенных по некоторому спектру. В этом смысле БАК работает как фотон-фотонный коллайдер. В ультрапериферических столкновениях можно искать Новую физику, которая может проявиться в результате слияния фотонов.

Одним из вариантов проявления Новой физики может стать рождение долгоживущих заряженных частиц — частиц, у которых время жизни достаточно велико, чтобы они могли вылететь из детектора и распасться за его пределами. Экспериментальные коллаборации ведут поиск таких частиц (см., например, [1–3]), и поставлен ряд ограничений на их массы, но все эти ограничения модельно зависимы. Дело в том, что сечение рождения долгоживущих частиц в адронных взаимодействиях зависит от модельных параметров, описывающих взаимодействие этих новых частиц с W - и Z -бозонами, либо с некими новыми бозо-

нами модели. Однако взаимодействие частиц с фотонами зависит только от электрического заряда частицы. Поэтому ультрапериферические столкновения на БАК позволяют вести поиск долгоживущих заряженных частиц в пространстве всего двух параметров: заряд и масса частицы.

В данной работе рассматривается рождение новых заряженных частиц с массой порядка 100 ГэВ в ультрапериферических столкновениях протонов с энергией 13 ТэВ или ионов свинца с энергией 5.02 ТэВ/(пара нуклонов) и предлагается метод поиска таких частиц с использованием передних детекторов коллабораций ATLAS и CMS. Особенностью метода является то, что в нем нет необходимости измерять потери энергии частиц на ионизацию или времена их пролета через детектор, поэтому он может использоваться как дополнительный к традиционным методам поиска.

2. СЕЧЕНИЯ РОЖДЕНИЯ

Одна из двух диаграмм Фейнмана, описывающих рождение пары долгоживущих заряженных частиц χ^\pm в ультрапериферическом столкновении протонов или ионов свинца в лидирующем приближении теории возмущений, представлена на рис. 1а. Согласно приближению эквивалентных фотонов (см. обзоры [4, 5]), фотоны в пропагаторах реальные и распределены по спектру

$$n(\omega) = \frac{Z^2 \alpha}{\pi^2 \omega} \int \frac{\mathbf{q}_\perp^2 F^2(\mathbf{q}_\perp^2 + (\omega/\gamma)^2)}{(\mathbf{q}_\perp^2 + (\omega/\gamma)^2)^2} d^2 q_\perp, \quad (1)$$

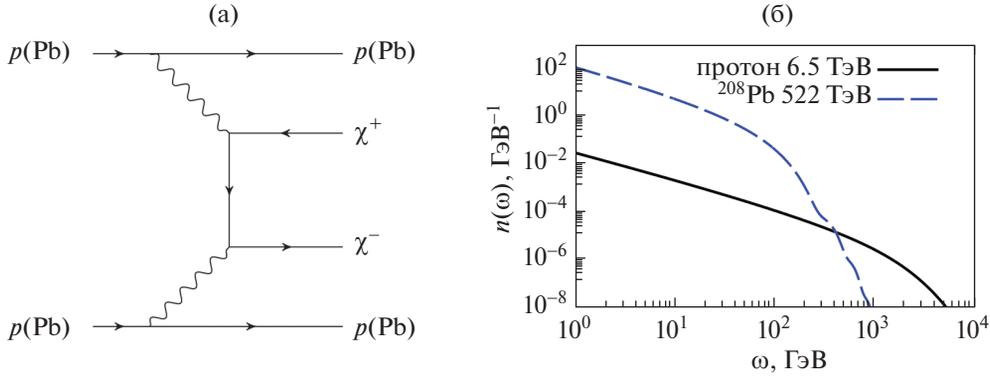


Рис. 1. (а) Рождение пары заряженных частиц в ультрапериферическом столкновении. (б) Спектры эквивалентных фотонов для протона с энергией 6.5 ТэВ и для ^{208}Pb с энергией 522 ТэВ.

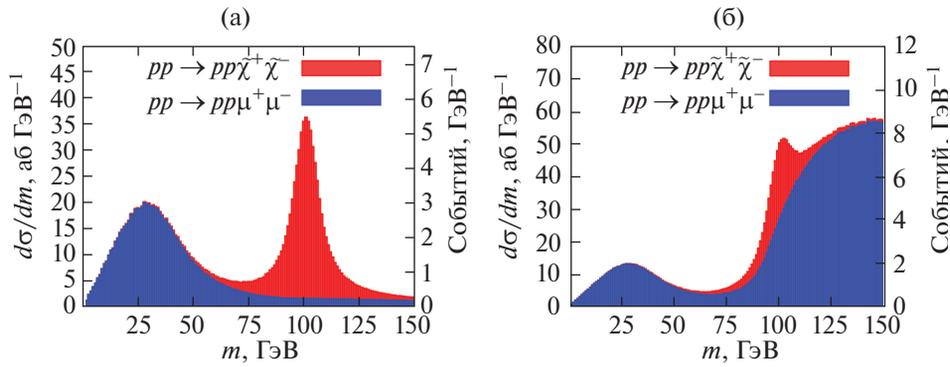


Рис. 2. Результаты моделирования распределения массы m (4) с учетом фона от процесса $pp \rightarrow pp\mu^+\mu^-$. Здесь и далее масса заряженных частиц принята равной $m_\chi = 100$ ГэВ, интегральная светимость – 150 фб^{-1} : (а) без учета множественности столкновения (pile-up); (б) считая, что в среднем происходит 50 столкновений одновременно.

где ω – энергия фотона, \mathbf{q}_\perp – его поперечный импульс, Ze – заряд частицы-источника фотонов, F – ее электромагнитный форм-фактор, γ – ее фактор Лоренца, $\alpha = e^2/4\pi$ – постоянная тонкой структуры. Сечение этого процесса можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} \sigma(pp \rightarrow pp\chi^+\chi^-) &= \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \sigma(\gamma\gamma \rightarrow \chi^+\chi^-) n(\omega_1) n(\omega_2) d\omega_1 d\omega_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \chi^+\chi^-)$ – сечение рождения пары заряженных частиц при столкновении реальных фотонов (сечение Брейта–Уилера [6]).

Спектры эквивалентных фотонов протона и ^{208}Pb для текущих энергий БАК представлены на рис. 1б. Благодаря большому электрическому заряду, ^{208}Pb дает больше фотонов, но меньшая энергия связи ядра приводит к тому, что форм-

фактор раньше обрезает спектр на высоких энергиях.

Сечения рождения частиц с массой $m_\chi = 100$ ГэВ [7]

$$\begin{aligned} \sigma(pp \rightarrow pp\chi^+\chi^-) &\approx 2.84 \text{ фб}, \\ \sigma(\text{Pb Pb} \rightarrow \text{Pb Pb}\chi^+\chi^-) &\approx 21.2 \text{ пкб}, \end{aligned} \quad (3)$$

где энергия столкновения протонов принята равной 13 ТэВ, энергия столкновения тяжелых ионов – 5.02 ТэВ/(пара нуклонов). Падение числа эквивалентных фотонов с ростом их энергии приводит к быстрому падению сечения рождения с ростом массы частиц, и для $m_\chi = 250$ ГэВ сечение рождения в столкновениях протонов будет около 0.1 фб, в столкновениях ионов – порядка 1 фб [7]. Интегральная светимость БАК в столкновениях тяжелых ионов сейчас составляет 2.5 нб^{-1} [8, 9] – это слишком мало, чтобы ожидать даже одно событие рождения пары частиц с

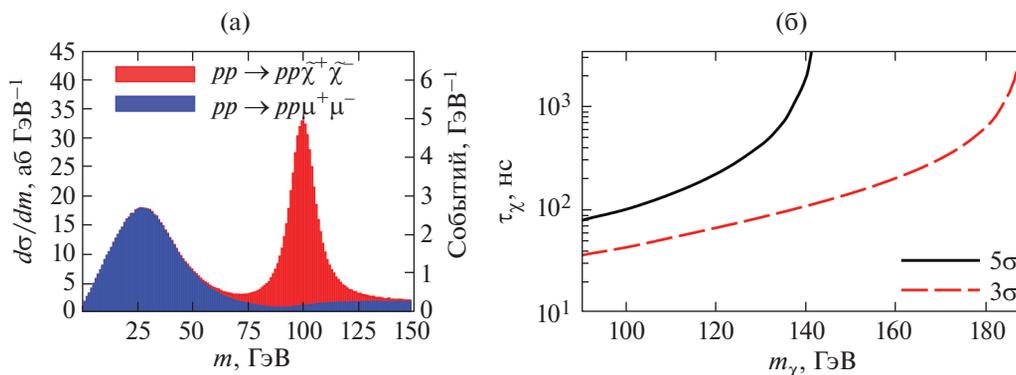


Рис. 3. (а) Распределение массы m (4) с учетом множественности столкновений (50 столкновений протонов одновременно) и с требованием сохранения полного продольного импульса системы (5). (б) Область параметров (m_χ, τ) , доступная для исследований с текущей интегральной светимостью БАК (150 фб⁻¹). В области выше кривой 3σ (5σ) можно найти пик в распределении m (4), выступающий на 3 (5) стандартных отклонений над фоном (считая, что в среднем происходит 50 столкновений протонов одновременно).

$m_\chi \sim 100$ ГэВ. Интегральная светимость в столкновениях протонов составляет 150 фб⁻¹, и здесь является доступной область масс $m_\chi \lesssim 250$ ГэВ.

3. МЕТОД ПОИСКА

Обычно долгоживущие заряженные частицы ищутся по их способности ионизировать вещество, либо по их скорости пролета через детектор. Ультрапериферические столкновения позволяют предложить еще один способ. Дело в том, что в конечном состоянии процесса рождения пары заряженных частиц в ультрапериферическом столкновении есть всего четыре частицы: две исходные столкнувшиеся и две новые родившиеся. Исходные частицы можно зарегистрировать в переднем детекторе и таким образом измерить их энергии после столкновения E_1 и E_2 . Импульсы новых частиц \mathbf{p}_1 и \mathbf{p}_2 измеряются по искривлению их траекторий в трековом детекторе. В результате можно полностью восстановить кинематику столкновения. Массу новых частиц можно вычислить по формуле [7]:

$$m = \sqrt{\frac{(2E_1E_2 + \mathbf{p}_1\mathbf{p}_2)^2 - \mathbf{p}_1^2\mathbf{p}_2^2}{4E_1E_2 + (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2}}. \quad (4)$$

Измеряя m в каждом событии, получим некоторое распределение. Это распределение будет иметь пик около $m = m_\chi$, размытый разрешением детектора. Единственная известная частица, которая может пройти детектор насквозь, — это мюон, поэтому должен наблюдаться аналогичный пик около $m = m_\mu$.¹ Результат моделирования такого измерения представлен на рис. 2а [7].

Более существенным источником фона в данном измерении будет наложение нескольких одновременных событий (pile-up). Во время работы

БАК в 2015–2018 гг. происходило до 70 столкновений протонов одновременно. Может случиться так, что в одном из этих столкновений родится пара мюонов, а в двух других уцелеет по одному протону, потерявшему достаточно энергии, чтобы попасть в передний детектор. Учет таких событий приводит к заметному росту фона в сигнальной области, как это видно на рис. 2б [7]. Причина заключается в том, что число эквивалентных фотонов быстро растет с уменьшением их энергии, поэтому рождение пары мюонов гораздо вероятнее рождения пары частиц с массой 100 ГэВ. На рис. 2а этот эффект был подавлен требованием, чтобы оба протона попадали в передний детектор: если на рождение пары частиц уходило меньше ≈ 200 ГэВ энергии [7], то протоны пролетали мимо. В случае множественности столкновений, один или оба протона могут прилететь из других событий.

Благодаря тому, что в ультрапериферических столкновениях полностью восстанавливается кинематика события, убрать фон от множественности столкновений довольно просто: достаточно потребовать сохранения полного продольного импульса системы:

$$|p_{\parallel,1} + p_{\parallel,2} + E_1 - E_2| < \hat{p}_\parallel, \quad (5)$$

где $p_{\parallel,1}$, $p_{\parallel,2}$, E_1 , $-E_2$ — продольные компоненты импульсов χ^+ , χ^- и протонов, а \hat{p}_\parallel — параметр обрезания. Распределение m для $\hat{p}_\parallel = 20$ ГэВ представлено на рис. 3а.

Можно ослабить требование к времени жизни частицы: пусть теперь частица живет лишь доста-

¹ Поскольку m_μ много меньше разрешения детектора, а m не может быть меньше нуля, в пике от мюонов половина событий будет отброшена (мнимое m), а сам пик будет смещен в сторону больших масс.

точно долго, чтобы пролететь часть детектора и распасться где-то внутри. В эксперименте это будет выглядеть как трек от заряженной частицы, который в какой-то точке обрывается или изламывается. К примеру, если долгоживущая частица — это легчайшее чарджино минимальной суперсимметричной модели $\tilde{\chi}_1^\pm$, то оно может распасться по каналу $\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \pi^\pm$, где $\tilde{\chi}_1^0$ — легчайшее нейтралино. Долгоживущим чарджино может быть только если разность масс чарджино и нейтралино невелика, так что родившийся пион будет иметь низкую энергию и будет быстро поглощен веществом детектора. В проводившихся до сих пор поисках подобных пропадающих треков рассматривалось рождение чарджино в адронных процессах, поэтому требовалось наличие адронных струй в конечных состояниях [10, 11]; в ультрапериферических столкновениях таких струй не будет.

Хотя поиск пропадающих (или изламывающихся) треков сам по себе является интересной задачей, будем просто отбрасывать события, в которых треки не проходят сквозь мюонную систему. Тогда можно оценить, какая область параметров (m_χ , τ), где τ — время жизни заряженной частицы, доступна для исследований с текущими данными БАК. Эта область приведена на рис. 3б [7].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультрапериферические столкновения позволяют проводить поиск новых заряженных частиц модельно независимым образом. Когда заряженные частицы рождаются в ультрапериферических столкновениях протонов, можно зарегистрировать все частицы в конечном состоянии и полностью восстановить кинематику события. В результате измеряется масса родившихся частиц. Предложенный метод поиска новых заряженных частиц можно рассматривать как дополнительный к методам, основанным на измерении тормозных потерь на ионизацию или времени пролета частицы через детектор.

Интегральная светимость 150 фб^{-1} в столкновениях протонов с энергией 13 ТэВ позволяет ис-

кать заряженные частицы с массой до 190 ГэВ и временем жизни от 100 нс. К сожалению, передние детекторы экспериментов ATLAS и CMS работали не все время Run 2, поэтому доступных для анализа данных в настоящий момент меньше.

Несмотря на то, что сечение рождения новых заряженных частиц в ультрапериферических столкновениях ядер свинца на порядки больше набранной на БАК статистики, оно слишком мало, чтобы ожидать даже одно событие рождения пары частиц массой 100 ГэВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом РФФ 19-12-00123.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *LHCb Collab.* // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. P. 595; arXiv:1506.09173
2. *CMS Collab.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. P. 112004; arXiv:1609.08382
3. *ATLAS Collab.* // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. P. 092007; arXiv:1902.01636
4. *Budnev V.M., Ginzburg I.F., Meledin G.V., Serbo V.G.* // Phys. Rep. 1975. V. 15. P. 181.
5. *Высоцкий М.И., Жемчугов Е.В.* // УФН. 2019. Т. 189. С. 975. <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.07.038389> [*Vysotsky M.I., Zhemchugov E.V.* // Phys. Usp. 2019. V. 62. P. 910. <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.07.038389>]; arXiv:1806.07238
6. *Breit G., Wheeler J.A.* Phys. Rev. 1934. V. 46. P. 1087.
7. *Godunov S.I., Novikov V.A., Rozanov A.N., Vysotsky M.I., Zhemchugov E.V.* // J. High Energy Phys. 2020. V. 2020. No. 1. P. 143. [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2020\)143](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2020)143); arXiv:1906.08568
8. CMS Luminosity—Public Results. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults>
9. ATLAS Luminosity—Public Results. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun2>
10. *ATLAS Collab.* // J. High Energy Phys. 2018. V. 2018. No. 6. P. 22. [https://doi.org/10.1007/JHEP06\(2018\)022](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2018)022); arXiv:1712.02118
11. *CMS Collab.* // J. High Energy Phys. 2018. V. 2018. No. 8. P. 16. [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2018\)016](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2018)016); arXiv:1804.07321

Long-lived Charged Particles in Ultrapерipheral Collisions at the LHC

E. V. Zhemchugov^{1, 2, *}

¹ *Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 117218 Russia*

² *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*
*e-mail: zhemchugov@itep.ru

Received May 8, 2020; revised July 31, 2020; accepted July 31, 2020

Abstract—Production of long-lived charged particles (LLCP) with the masses of the order of 100 GeV in ultraperipheral collisions (UPC) of protons or heavy ions at the Large Hadron Collider (LHC) is considered. A new approach for the search of such particles utilizing forward detectors of the ATLAS and CMS collaborations is proposed. Achievable bounds on the masses and lifetimes of the LLCP are estimated from the currently available LHC data.